

基于多编码板准直器的瞬发 γ 射线活化成像

贾文宝¹ 陈奕泽¹ 黑大千² 赵冬¹ 程璨^{1,3}

1(南京航空航天大学 南京 210000)

2(兰州大学 兰州 730000)

3(核技术应用教育部工程研究中心 东华理工大学 南昌 330013)

摘要 瞬发 γ 射线活化成像(Prompt Gamma-ray Activation Image, PGAI)技术可对大体积样品内部元素分布进行无损测量,具有广阔的应用前景。目前,PGAI测量平台主要集中在能够提供高中子通量的反应堆中子源上,限制了该技术的现场应用,基于中子发生器和同位素中子源的PGAI技术可用于现场测量,但其较低的中子通量使得测量图像分辨率差。针对此问题,提出一种基于多编码板准直器的PGAI成像方法,采用36块编码准直板和最大似然期望最大化(Maximum Likelihood Expectation Maximization, MLEM)算法对板状样品中的氯(Cl)元素空间分布进行测量分析,编码板的开孔大小为1 cm \times 1 cm。利用蒙特卡罗程序MCNP对6 cm \times 6 cm \times 1 cm(长 \times 宽 \times 厚)样品进行了模拟实验,结果显示:重建图像与原图像的相对偏差为0.065 8,结构相似性(Structural Similarity, SSIM)为0.952 1;表明利用该方法可以对Cl元素的分布进行测量,重建图像与设置的样品图像吻合。

关键词 元素成像, 瞬发 γ 射线活化成像, 编码板准直器, 蒙特卡罗模拟

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.100201

Prompt gamma-ray activation imaging based on multi coded-aperture collimators

JIA Wenbao¹ CHEN Yize¹ HEI Daqian² ZHAO Dong¹ CHENG Can^{1,3}

1(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

2(Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

3(Engineering Research Center of Nuclear Technology Application, Ministry of Education, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract [Background] Prompt gamma-ray activation image (PGAI) is a non-destructive element imaging method for large volume samples. Most of PGAI platforms are located in research reactors, which limit their applications. From the perspective of in-field applications, attractive alternative neutron sources are isotope neutron source and neutron generator. However, the neutron fluxes of these sources are much lower than that of reactor neutron source, which leads a poor spatial resolution. [Purpose] This study aims to solve this problem by implementing an approach based on multi coded-aperture collimators. [Methods] First of all, the Monte Carlo code MCNP5 was employed to calculate spatial distribution of Cl in a known sample, and the characteristic gamma rays were produced by the thermal neutrons absorbed by the sample. Then, 36 coded-aperture collimators with random holes were used to collimate gamma rays, and 36 gamma signals were collected by high-purity germanium detectors (HPGe). Finally, the imaging of Cl was reconstructed through these data and maximum likelihood expectation maximization (MLEM) algorithm, and the relative deviation (d_r) and structural similarity (SSIM) were chosen to evaluate the image quality. [Results] The spatial resolution of the imaging is 1 cm \times 1 cm, and the relative deviation

国家自然科学基金(No.11975121、No.12105143)、核科技应用教育部工程研究中心开放基金(No.HJSJYB2020-1)资助

第一作者: 贾文宝, 男, 1968年出生, 1999年于兰州大学获博士学位, 研究领域为核分析技术及其在环境中的应用等

通信作者: 程璨, E-mail: cheng_can@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2022-05-10, 修回日期: 2022-07-06

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11975121, No.12105143), Open Fund of Engineering Research Center of Ministry of Education for Nuclear Science and Technology Applications (No.HJSJYB2020-1)

First author: JIA Wenbao, male, born in 1968, graduated from Lanzhou University with a doctoral degree in 1999, focusing on nuclear analysis technology and its application in the environment, etc.

Corresponding author: CHENG Can, E-mail: cheng_can@nuaa.edu.cn

Received date: 2022-05-10, revised date: 2022-07-06

and SSIM between the reconstructed image and the original image are 0.065 8 and 0.952 1, respectively. After neutron self-shielding correction, the relative deviation and SSIM between the reconstructed image and the original image are 0.002 3 and 0.998 4, respectively, which shows a good agreement. [Conclusions] The proposed approach is efficient to measure the distribution of Cl element, hence for element imaging of plate samples, and the reconstructed image is consistent with the set sample image.

Key words Elemental imaging, PGAI, Coded-aperture collimator, Monte Carlo simulation

瞬发 γ 射线成像(Prompt Gamma-ray Activation Image, PGAI)技术是一种新型元素成像方法,该技术基于瞬发 γ 射线中子活化分析(Prompt Gamma Neutron Activation Analysis, PGNA)并结合准直测量手段,可以实现对样品内部元素空间分布分析。由于中子具有良好的穿透能力,这一优势使该技术十分适用于大块样品的成分和结构分析。近年来,该技术已被应用于文物、天文和安全检测等众多领域的分析工作。PGAI技术的基础是PGNA技术,其利用中子与核素发生非弹性散射反应或辐射俘获反应,在极短的时间内产生能够表征核素信息的特征 γ 射线,通过采集特征 γ 射线能谱并对样品内核素进行分析。

由于PGAI技术在多个领域具有重要应用前景,包括我国在内的多个国家均开展了大量的研究。目前PGAI测量平台主要集中在反应堆中子源或大型加速器中子源上搭建,目前较为成熟的测量平台位于匈牙利布达佩斯的中子中心(Budapest Neutron Center, BNC)的反应堆和德国慕尼黑工业大学FRM II反应堆上^[1-4]。在这两个PGAI测量平台上已经完成大量实验,包括对古文物检测、核燃料位置识别、化石生物结构分析等,样品处的热中子通量为 $10^7\sim 10^9\text{ s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$,可以实现较高分辨率(2~5 mm量级)的元素成像^[5-7]。随着新型的探测器和探测技术发展,美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)反应堆上开展了基于康普顿相机的PGAI研究^[8],但是对 γ 射线的能量分辨率以及对高能 γ 射线的探测效率受到限制,仍有待探索。韩国原子能科学院也开展了基于符合测量的PGAI研究,对相关探测器系统进行了模拟探索研究^[9]。国内方面,在中国先进研究堆(China Advanced Research Reactor, CARR)以及中国绵阳研究堆(China Mianyang Research Reactor, CMRR)上也开展了PGAI技术的研究工作,但目前处于验证性研究的阶段^[10]。

然而,基于反应堆中子源的PGAI技术无法实现现场应用,极大地限制了该技术的应用场景。基于同位素中子源和中子发生器的PGAI技术在现场应用中更具优势,在先前的研究中,利用DT中子发生器搭建了PGAI测量平台,对B样品、金属样品进

行了元素成像,空间分辨率可达到约 $4\text{ cm}^{[11-12]}$ 。但小型中子源存在中子通量低的缺点,为保证重建图像质量,要想在合理的测量时间内进行测量,则需要增大测量体积,使得测量结果的空间分辨率下降。

编码成像技术为解决空间分辨率与测量时间之间的矛盾提供了重要的思路,由于编码开孔数量多,探测系统的探测效率高,同时单个编码孔尺寸小,保证了重建图像的分辨率。目前编码成像技术主要应用于编码孔径成像、时序编码成像、荧光光谱分析(X-ray Fluorescence, XRF)等技术中^[13-15]。在编码孔径成像中,往往采用阵列探测器对信号进行收集,但阵列探测器无法实现特征峰的能量测量,不适合PGAI测量。而在时序编码成像中利用时间调制信号强度实现单个探测器的位置甄别,代替了阵列探测器。在XRF成像技术中,研究者近年同样将目光聚焦于能够提供更高X射线荧光传输效率的编码孔准直器上,以弥补该技术中常采用的单孔准直器传输效率低的缺陷。

本文通过MCNP,对基于多编码板准直的PGAI技术进行模拟研究。以氯(Cl)作为目标元素进行二维元素成像,采用高纯锗探测器对经过不同编码板准直器准直的 γ 射线进行收集,利用MLEM迭代算法对多组 γ 射线信号进行分析,拟实现对 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 像素大小的元素空间分布图像。

1 方法与模拟设计

1.1 多编码准直器PGAI测量方法

基于多编码准直器的PGAI利用中子束对整块样品进行辐照,并用多块编码板准直器对产生的 γ 射线进行准直,被准直的 γ 射线被后方的高纯锗探测器接收,基本原理如图1所示。采集到的特征 γ 射线计数为:

$$Q = N_A \frac{m}{M} \cdot \eta \cdot \phi \cdot \sigma \cdot \lambda \cdot \varepsilon \cdot t \quad (1)$$

式中: Q 为探测器所采集的待测量核素产生的特征 γ 射线净计数; N_A 为阿伏伽德罗常数; m 为该核素的质量; M 为该核素的原子量; η 为该核素的天然同位素丰度; ϕ 为中子通量; σ 为中子与该核素的反应截面; λ 为特征 γ 射线分支比; ε 为探测效率; t 为测量时间。

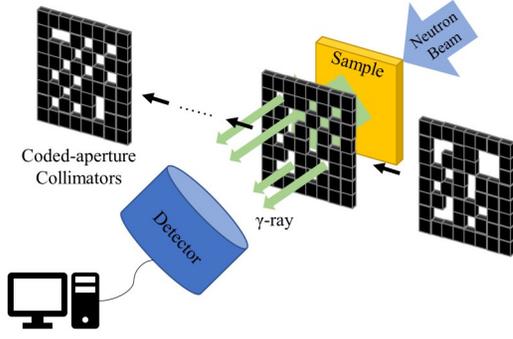


图1 基于多编码板准直的PGAI技术原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of PGAI measurement based on multi-coded collimators

将单个编码孔大小作为样品的最小像素单元，探测器收集的特征 γ 射线计数由编码准直板开孔位置对应的所有像素所激发出来的特征 γ 射线乘上相应探测效率累积而来。此时，式(1)可以表示为：

$$Q = \sum_{n=1}^j \phi_n \cdot \varepsilon_n \cdot m_n \cdot K \quad (2)$$

式中： ϕ_n 表示像素 n 位置处的中子通量； ε_n 表示像素 n 产生的特征 γ 射线被探测器采集的探测效率； m_n 为像素 n 处待测核素的质量； K 为式(1)中其他常数参数的乘积。

采用 i 块不同开孔方式的编码准直板进行多次测量后，将得到如下方程：

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_i \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \dots & \varepsilon_{1j} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{21} & \dots & \varepsilon_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varepsilon_{i1} & \varepsilon_{i2} & \dots & \varepsilon_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 & \phi_2 & \dots & \phi_j \\ \phi_1 & \phi_2 & \dots & \phi_j \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_1 & \phi_2 & \dots & \phi_j \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \dots \\ m_j \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中， $[Q]$ 可由采集的 γ 射线能谱获取， $[\varepsilon]$ 中每个像素点对不同编码板时，探测效率都是不同的，需要通过模拟获取，而 $[\phi]$ 会受到样品的中子自屏效应影响，需要模拟获取中子自屏修正因子。当上述参数都获得后，便可以通过最大似然期望最大化(Maximum Likelihood Expectation Maximization, MLEM)算法，计算出 $[m]$ ，即重建元素分布图像^[16]。MLEM是建立在泊松模型上的统计迭代算法，中子与物质发生辐射俘获反应或非弹性散射激发出特征 γ 射线的过程同样服从泊松分布，同时统计迭代算法能较方便在图像边界、噪声位置添加约束条件，获得质量较高的重建图像^[17]。迭代公式为：

$$f_j^{k+1} = \frac{f_j^k}{\sum_i H_{ij}} \sum_i H_{ij} \frac{Q_i}{\sum_j H_{ij} f_j^k} \quad (4)$$

式中： f_j^{k+1} 表示像素 j 迭代了 $k+1$ 次后的重建灰度

值； f_j^k 表示像素 j 迭代了 k 次后的重建灰度值； H_{ij} 表示第 i 块编码板准直时，像素 j 的响应函数，在本研究中表示中子通量与探测效率的乘积。

1.2 MCNP模型

本研究使用蒙特卡罗模拟软件MCNP5对设定样品中的Cl元素进行检测仿真，采用的核数据库为ENDF/B-VI。利用MCNP5建立的几何模型如图2所示，测量装置由中子源、样品、编码准直器、 γ 射线探测器组成，其几何中心均在 y 轴正方向上。

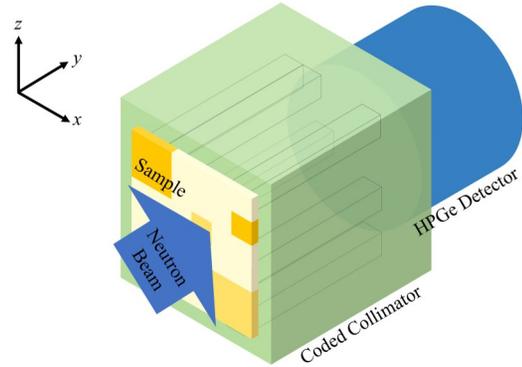


图2 元素成像测量装置MCNP模型
Fig.2 MCNP model of element imaging measuring device

中子源设置为单向面源，截面积为 $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ ，以 y 轴正方向发射能量为 0.025 eV 的热中子，粒子数设置为十亿，以确保模拟计数的统计性。

样品尺寸设置为 $6\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 厚)，像素点大小为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ (长 \times 宽)，每个像素点以一定的空间分布填充氯化钠(NaCl)和碳酸钠(Na_2CO_3)，其中NaCl又设置了两种不同的密度，样品成分分布情况以及像素编号如图3所示。

准直器选择Fe作为材料，横截面为 $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ ，其中编码开孔区域是样品面积对应的 $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 范

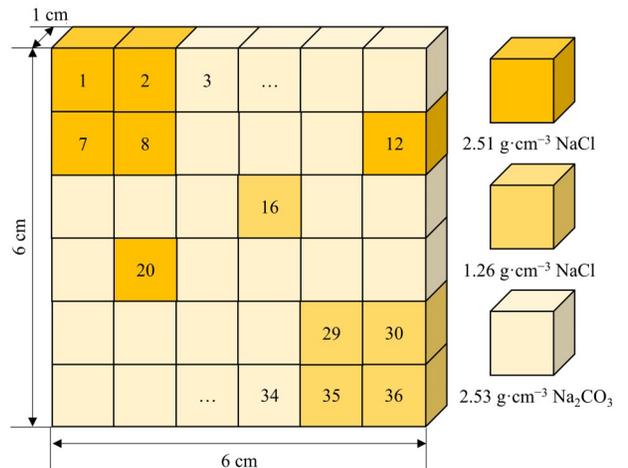


图3 样品成分分布情况
Fig.3 Composition distribution of sample

围内,同时向四周覆盖有1 cm Fe以屏蔽从周围漏射的 γ 射线,如图2所示。准直长度(y 轴方向)为10 cm。编码方式为经过挑选的随机开孔方式,开孔

率为50%。一共设计了36块编码板准直器,设计的原则是尽量保证每个像素点对应的开孔次数在18次左右。图4给出了设计的部分编码图案。

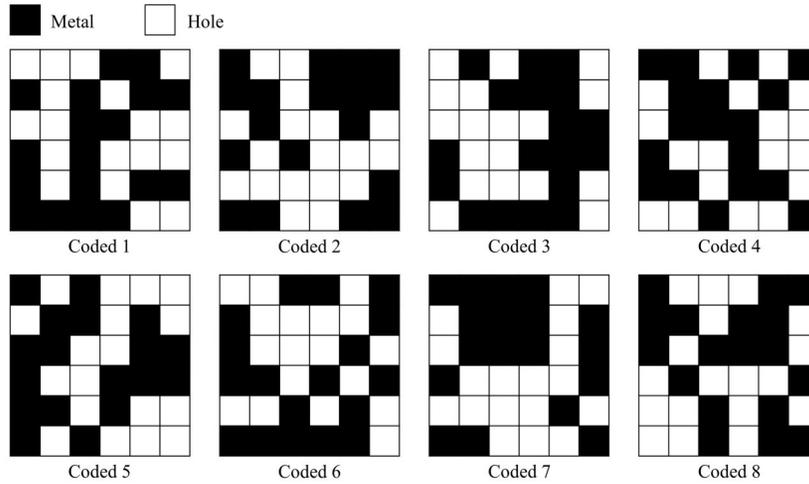


图4 几种典型的编码方式
Fig.4 Several typical pattern of coded-aperture collimators

γ 射线探测器选择能量分辨率高的高纯锗探测器,模型根据型号为GMX30P4-70的高纯锗探测器进行构建^[18],其锗晶体直径为66.8 mm,长70.7 mm。

本模拟以热中子与核素发生辐射俘获反应为基础。样品中Cl元素与热中子反应发射的能量在2 MeV以下的部分特征 γ 射线能量由表1给出^[18],最终选择能量为1.164 MeV的特征 γ 射线对Cl元素分布图像进行重建。

表1 Cl的特征 γ 射线能量
Table 1 Characteristic gamma ray energy of Cl

能量 Energy / MeV	反应截面 Cross sections / b
0.517	7.58
0.786	3.42
0.788	5.42
1.164	8.91
1.601	1.21
1.951	6.33
1.959	4.10

本研究需要对中子通量和探测效率进行模拟。MCNP模拟软件中,可以用F4计数卡对样品栅元内的平均中子通量进行模拟,同时也可以用来对中子场进行修正;可用F8计数卡模拟探测器中的能量沉积以及探测效率,同时通过与E8计数能量卡结合使用,可以模拟探测器能谱,从而获得Cl元素特征 γ 射线计数。

2 结果和讨论

2.1 γ 射线能谱

用MCNP中F8计数卡记录高纯锗探测器中Ge晶体内的 γ 射线能量沉积情况,模拟获取的 γ 射线能谱图如图5(a)所示,表1中部分能量的特征峰在图5(a)中清晰可见。选择能量为1.164 MeV的特征 γ 射线计数进行Cl元素图像重建,计算该能量的特征峰峰面积,在不同编码板准直器准直后,采集到的Cl元素特征 γ 射线计数会产生变化,这种变化是随编码方式的变化而变化的,这也是能够通过MLEM算法重建图像的基础,部分编码准直后,1.164 MeV特征峰如图5(b)所示,图中也展现了峰面积的差异。

2.2 探测效率模拟结果

探测效率与特征 γ 射线能量、探测器灵敏体积和形状、探测器与源所张立体角等因素有关。中子活化样品中Cl元素后,产生特征 γ 射线,此时可以将每一个像素点都看成一个能量为1.164 MeV的 γ 射线源,因此模拟获取探测效率矩阵时,直接将该能量的 γ 射线源依次设置在每个像素点内来获取每个像素点对应某一开孔方式的编码板准直器的探测效率,并用F8计数卡记录,这样不仅可以加快模拟的速度,同时也不用再考虑 γ 射线自吸收的问题。

对于编码开孔的位置, γ 射线能透过准直板到达探测器位置,而未开孔的位置, γ 射线被屏蔽,因此探测效率矩阵会与编码开孔方式所对应,通过模拟也印证了这一点,但产生的特征 γ 射线是各向同性发

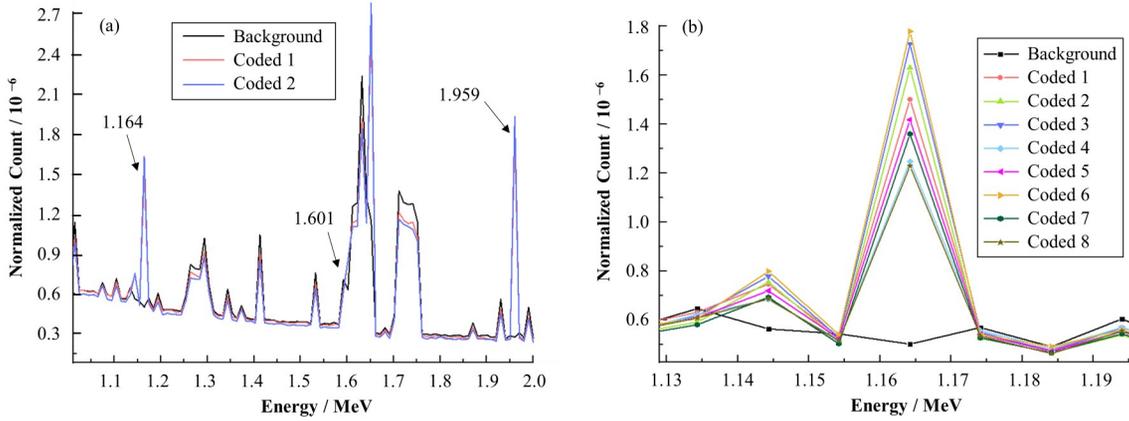


图5 γ 射线能谱图(a),不同编码准直板准直下的Cl元素1.164 MeV特征峰(b)
Fig.5 γ ray spectrogram (a) and Cl element 1.164 MeV characteristic peak under different coded collimators (b)

射的,某一像素点四周的开孔情况也会影响到探测效率,因此探测效率矩阵和开孔方式有一定差异,如

图6所示,为图4给出的编码方式下获得的探测效率灰度图。

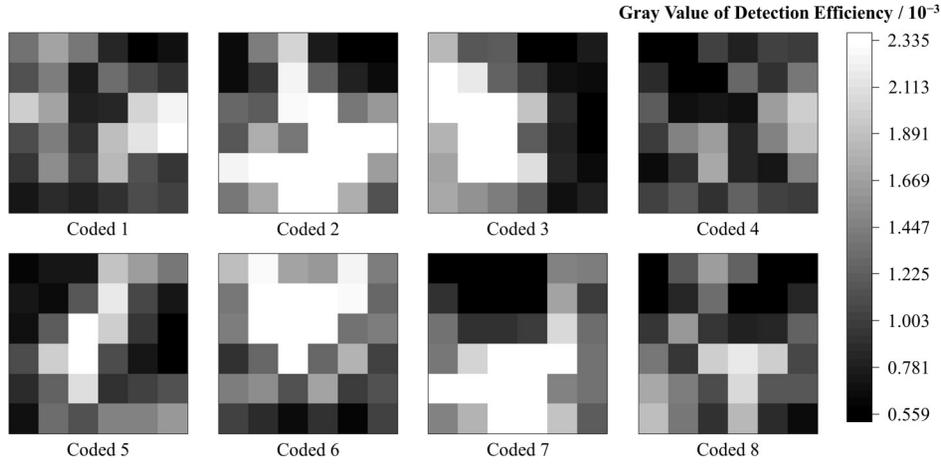


图6 部分探测效率灰度图
Fig.6 Gray scale image of partial detection efficiency

2.3 Cl元素空间分布重建

模拟获取多编码板准直后探测器采集的 γ 射线能谱图,得到特征 γ 射线计数。对样品中Cl元素的位置和相对含量进行分析,采用最大似然期望最大化迭代算法进行图像重建,引入相对偏差 d_f ^[19]以及结构相似性(Structural Similarity, SSIM)^[20]对重建图像的质量进行评价。

相对偏差定义为:

$$d_f = \frac{\sum_j (f_j - f_{0j})^2}{\sum_j f_j^2} \quad (5)$$

式中: f_j 为重建图像中像素 j 的灰度值; f_{0j} 为原图像中像素 j 的灰度值。该参数能在已知原图像的情况下,更加直观地评价重建图像的质量。

结构相似性定义为:

$$SSIM(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (6)$$

式中: μ_x 为图像 x 的均值; σ_x 为图像 x 的标准差; y 同理; σ_{xy} 为协方差; c_1 、 c_2 为常数项,避免分母为0;SSIM的范围为-1~1,两个图像越相似,这个值越接近1。该参数从亮度、对比度和结构三个方面来对比两张图像。

对模拟样品中Cl元素空间分布情况成像,结果如图7所示。重建图像与原图像的相对偏差为0.065 8, SSIM为0.952 1,可以看出,对Cl元素位置分析十分准确,密度相同的像素灰度值相近,但不同密度像素点的灰度值之间差异与实际质量之间的差异不对应,造成这一现象的原因是中子自屏效应,因此利用MCNP对中子自屏效应进行修正。

均匀中子面源发射的中子束在到达样品表面

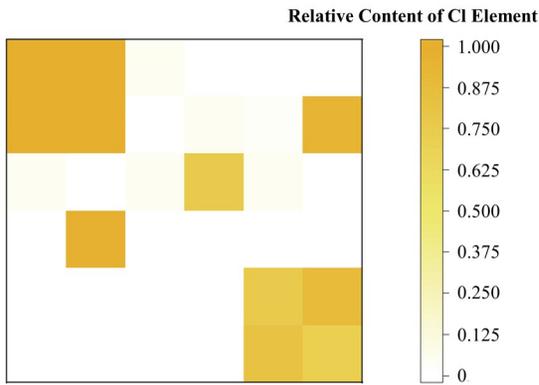


图7 未考虑中子自屏效应的Cl元素重建图像
Fig.7 Cl element reconstruction without considering neutron self shielding effect

时,中子通量是均匀的,但中子穿透样品后,样品内部核素种类以及分布不均匀,会使得样品内部的中子场不均匀,这被称为中子自屏效应^[21]。中子自屏效应会影响核素的定量分析,因此需要通过一些手段来对其进行修正。

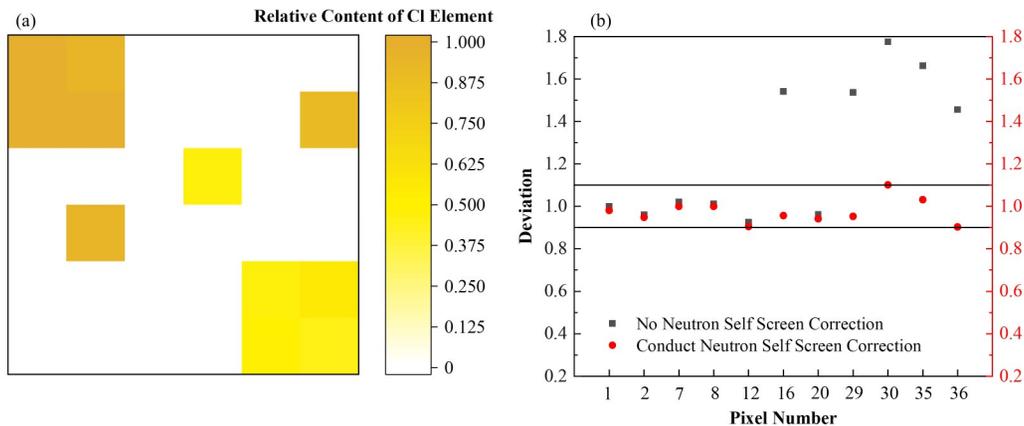


图8 中子自屏修正后的Cl元素重建图像(a),含Cl的11个像素模拟结果与真值的偏差(b)
Fig.8 Reconstructed image of Cl element after neutron self screen correction (a), deviation between simulation results of 11 pixels with Cl and true value (b)

从模拟结果来看,将编码孔应用于PGAI技术是可行的,若要将该方法实施到实际实验中,需要注意以下几个问题:

1)对探测效率的刻度要准确。由于每个像素对不同编码准直板时的探测效率都是不同的,通过实验一个一个测量并不合适,可以通过本文提到的用MCNP模拟获取探测效率的方式,这要求已知探测器内部结构的尺寸、材料等信息。

2)中子自屏修正。针对实际样品,采用合适的中子自屏修正方法,中子自屏效应会影响到元素的定量分析。

在已知模拟样品内部的核素分布情况、密度的情况下,采用MCNP中的F4计数卡对该预设样品各个像素点处的中子自屏修正因子进行计算。将像素点栅元内的F4计数与无限稀释情况下该像素点栅元内的F4计数之比作为该像素点的中子自屏修正因子 $f_n^{[21]}$,可表示为:

$$f_n = \frac{\overline{\phi}_{vr}}{\overline{\phi}_{vd}} \quad (7)$$

由于NaCl密度不同,不同像素的中子自屏因子不同,密度大的像素中子自屏效应越明显, f_n 越小,反之亦然。对模拟Cl元素分布重建图像进行自屏修正后,如图8(a)所示,对Cl元素的定量分析更加准确,相对偏差减小为0.0023,SSIM提高到0.9984。含Cl元素的像素点的测量结果与真值的偏差均在10%以内,如图8(b)所示。在实际未知样品的测量中,中子自屏修正是一个无法忽视的问题,常用的中子自屏修正方法除了本文提到的模拟修正外,还可以结合热中子照相技术或利用活化箔监测等手段进行实验修正。

3)可以通过同时添加中子束编码准直器,实现对样品的三维成像。

3 结语

小型中子源PGAI技术具有很好的应用前景,但受到小型中子源中子通量低的影响,成像分辨率较低。本文介绍了一种将编码板准直器结合到PGAI技术中用于元素成像的手段,旨在解决小型中子源成像分辨率低的问题,并通过蒙特卡罗模拟手段验证了该方法的可行性。从模拟结果上来看,成功做到了1 cm×1 cm像素大小的元素空间分布成

像,重建图像与原图像相似度高,相对偏差小。因此,从拓展PGAI技术应用范围的角度来看,基于编码板准直器的PGAI技术具有一定的研究价值,值得后续开展相关实验。

作者贡献声明 贾文宝:负责文章框架和最终版本的修订;陈奕泽:负责模拟仿真及数据分析和文章起草撰写;黑大千:负责文章资料的查阅及整理;赵冬:负责文章资料的查阅;程璨:负责文章的修改和整体把握。

参考文献

- Belgya T, Kis Z, Szentmiklósi L, *et al.* First elemental imaging experiments on a combined PGAI and NT setup at the Budapest Research Reactor[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2008, **278**(3): 751–754. DOI: 10.1007/s10967-008-1605-7.
- Belgya T, Kis Z, Szentmiklósi L, *et al.* A new PGAI-NT setup at the NIPS facility of the Budapest Research Reactor[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2008, **278**(3): 713–718. DOI: 10.1007/s10967-008-1510-0.
- Kis Z, Szentmiklósi L, Belgya T. NIPS-NORMA station-a combined facility for neutron-based nondestructive element analysis and imaging at the Budapest Neutron Centre[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, **779**: 116–123. DOI: 10.1016/j.nima.2015.01.047.
- Kis Z, Belgya T, Szentmiklósi L. Monte Carlo simulations towards semi-quantitative prompt gamma activation imaging[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, **638**(1): 143–146. DOI: 10.1016/j.nima.2011.02.062.
- Maróti B, Polonkai B, Szilágyi V, *et al.* Joint application of structured-light optical scanning, neutron tomography and position-sensitive prompt gamma activation analysis for the non-destructive structural and compositional characterization of fossil echinoids[J]. *NDT & E International*, 2020, **115**: 102295. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102295.
- Szentmiklósi L, Kis Z. Characterizing nuclear materials hidden in lead containers by neutron-tomography-driven prompt gamma activation imaging (PGAI-NT) [J]. *Analytical Methods*, 2015, **7**(7): 3157–3163. DOI: 10.1039/C5AY00199D.
- Kis Z, Sciarretta F, Szentmiklósi L. Water uptake experiments of historic construction materials from Venice by neutron imaging and PGAI methods[J]. *Materials and Structures*, 2017, **50**(2): 159. DOI: 10.1617/s11527-017-1004-z.
- Chen-Mayer H H, Brown S, Yang H. Feasibility study of Compton imaging for PGAA[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2019, **322**(3): 1729–1738. DOI: 10.1007/s10967-019-06818-w.
- Lee H R, Kim J, Sun G M. Monte Carlo simulation study on coincidence-based imaging system for neutron-induced prompt-gamma activation imaging[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2018, **318**(3): 2285–2289. DOI: 10.1007/s10967-018-6302-6.
- 杨鑫, 李润东, 王冠博, 等. 瞬发 γ 射线活化分析与中子层析照相联合测量技术[J]. *同位素*, 2017, **30**(3): 153–163. DOI: 10.7538/tws.2017.youxian.019.
- YANG Xin, LI Rundong, WANG Guanbo, *et al.* Combination of prompt gamma-ray activation analysis and neutron tomography[J]. *Journal of Isotopes*, 2017, **30**(3): 153–163. DOI: 10.7538/tws.2017.youxian.019.
- 耿书群. 基于热中子的瞬发 γ 射线活化成像技术的模拟研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- GENG Shuqun. Simulation study of prompt gamma activation imaging technology based on the thermal neutron[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- Hei D Q, Jia W B, Cheng C, *et al.* Feasibility study of fast neutron-induced gamma ray imaging of large sample based on D-T neutron generator[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms*, 2021, **492**: 7–14. DOI: 10.1016/j.nimb.2021.01.014.
- 刘崎. 编码孔径成像放射源定位关键技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- LIU Qi. Research on key techniques of radioactive sources localization in coded-aperture imaging[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- Brown S T, Goodman D, Chu J Y, *et al.* Time-encoded gamma-ray imaging using a 3-D position-sensitive CdZnTe detector array[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2020, **67**(2): 464–472. DOI: 10.1109/TNS.2019.2953182.
- Kulow A, Buzanich A G, Reinholz U, *et al.* On the way to full-field X-ray fluorescence spectroscopy imaging with

- coded apertures[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2020, **35**(2): 347 – 356. DOI: 10.1039/C9JA00232D.
- 16 Vardi Y, Shepp L A, Kaufman L. A statistical model for positron emission tomography: rejoinder[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1985, **80**(389): 34. DOI: 10.2307/2288037.
- 17 高娟. 基于欠采样的PET图像重建算法研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
GAO Juan. Research on PET image reconstruction algorithm based on under-sampling[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2018.
- 18 Cheng C, Wei Z Y, Hei D Q, *et al.* MCNP benchmark of a ^{252}Cf source-based PGNA system for bulk sample analysis[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2020, **158**: 109045. DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109045.
- 19 Molnár G L. Handbook of prompt gamma activation analysis[M]. Budapest, Hungary: Chemical Research Centre, 2004.
- 20 Boudjelal A, Elmoataz A, Attallah B, *et al.* A novel iterative MLEM image reconstruction algorithm based on beltrami filter: application to ECT images[J]. *Tomography*, 2021, **7**(3): 286 – 300. DOI: 10.3390/tomography7030026.
- 21 Bakurov I, Buzzelli M, Schettini R, *et al.* Structural similarity index (SSIM) revisited: a data-driven approach [J]. *Expert Systems With Applications*, 2022, **189**: 116087. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.116087.
- 22 Szentmikl L, Kis Z, Mar B, *et al.* Correction for neutron self-shielding and gamma-ray self-absorption in prompt-gamma activation analysis for large and irregularly shaped samples[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2021, **36**(1): 103 – 110. DOI: 10.1039/D0JA00364F.1.